*L'ettringite est une réaction naturelle qui se produit à l'intérieur du béton, soit au moment de l'hydratation du ciment, soit de manière différée. Christophe Carde, directeur technique du LERM[1] nous en explique les mécanismes.*

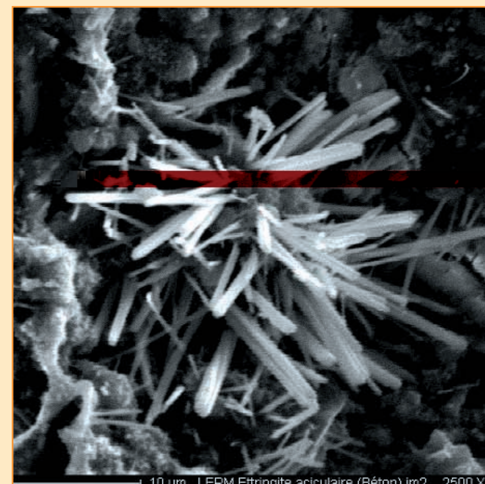
## Pathologie
# L'Ettringite

## 1 > Quels sont les différents types d'ettringite ?

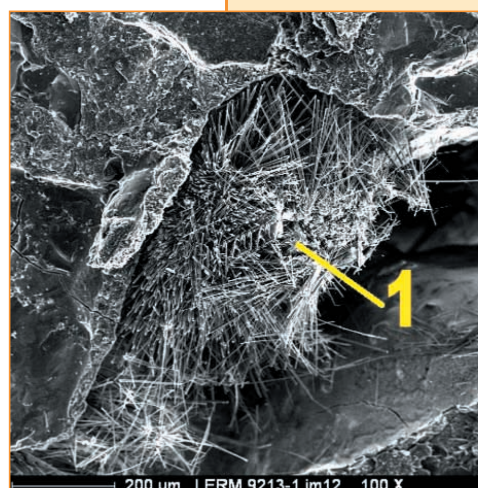
On distingue trois types d'ettringite qui peuvent coexister dans un même béton. Elles se différencient essentiellement par les conditions de leur formation :

- **l'ettringite de formation primaire (a)** qui ne provoque pas d'expansion,
- **l'ettringite de formation secondaire (b)** qui peut provoquer une expansion,
- **l'ettringite de formation différée (c)** consécutive à une élévation de température subie par le béton au cours de son histoire, qui peut aussi provoquer une expansion dans les bétons.

**a – L'ettringite de formation primaire** correspond à un produit issu de l'hydratation des ciments qui se forme par réaction entre le régulateur de prise (gypse, hémihydrate, anhydrite) et les aluminates de calcium. Ces cristaux, de forme aciculaire, ne provoquent pas de gonflement car ils cristallisent avant le durcissement du béton, dans les espaces libres du matériau. Ils revêtent même un caractère bénéfique, puisqu'ils contribuent à la cohésion de la pâte de ciment au jeune âge, leur formation étant accompagnée par une diminution de la porosité et par une augmentation concomitante de la résistance mécanique du mélange.

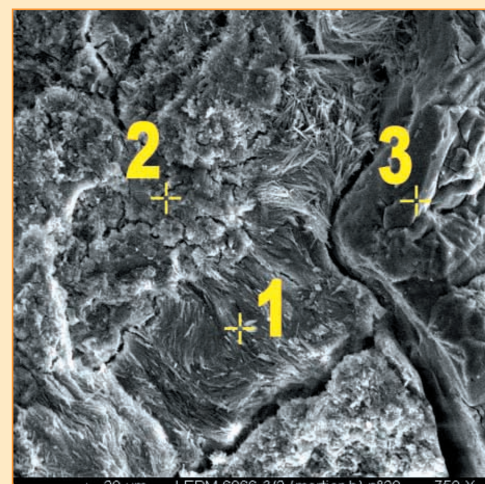



**b – L'ettringite de formation secondaire** correspond à une ettringite qui cristallise dans le béton durci, à la faveur de circulation d'eau dans les bétons (phénomènes de dissolution/recristallisation) et de sources de sulfates externes (sols, milieu marin...) ou internes (quantités trop importantes de sulfates dans les constituants du béton). Cette ettringite peut générer des gonflements internes pouvant conduire à l'apparition de désordres sur les ouvrages. Dans le cas des phénomènes de dissolution/recristallisation, elle cristallise sous forme aciculaire dans les espaces libres du béton (pores, fissures, interfaces pâte-granulats) à partir de la solution interstitielle ou à la faveur de percolation d'eau dans le matériau poreux ou fissuré, et ne présente généralement pas de caractère expansif. En revanche, l'ettringite de formation secondaire consécutive à un apport externe ou interne de sulfates, est susceptible de générer des gonflements internes principalement attribués aux pressions de cristallisation. Contrairement aux faciès non expansifs, cette ettringite pathologique cristallise sous une forme massive et comprimée.




(1),

**c – L'ettringite de formation différée** (plus connue sous le nom de DEF - Delayed Ettringite Formation) concerne uniquement des bétons ayant subi, au jeune âge, une augmentation de température supérieure à 65-70 °C, température au-delà de laquelle l'ettringite de formation primaire ne peut se former au cours des réactions d'hydratation du ciment et/ou est décomposée. De telles conditions de température peuvent se produire au cours de traitements par étuvage ou dans le cas de pièces massives en béton. Par la suite, des cristaux d'ettringite peuvent se former, après retour à température ambiante et en présence d'humidité, dans le béton durci, et sont ainsi susceptibles de provoquer des pressions de gonflement conduisant à des phénomènes d'expansion.



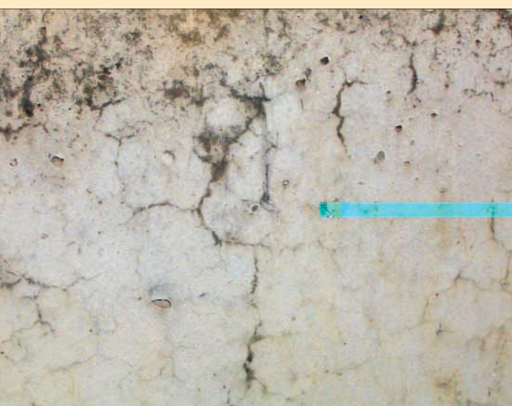

(1 2)
(3),

## 2 > Quelles sont les conséquences du gonflement lié à l'ettringite ?

Les désordres consécutifs aux pressions de gonflement liées à la formation d'ettringite correspondent à des phénomènes de fissuration multidirectionnelle peu différents de ceux observés dans le cas des phénomènes d'alcali-réaction. Cette fissuration peut diminuer la capacité portante des ouvrages. Il convient néanmoins de souligner que dans le cas des attaques sulfatiques externes, liées à la présence d'une source de sulfates dans le milieu environnant, la dégradation s'effectue progressivement du parement vers le cœur des éléments en béton.
En revanche, dans le cas d'une formation d'ettringite liée à une source interne de sulfates (ettringite différée ou réserve excessive en sulfates dans les constituants du béton), la dégradation affecte la masse des éléments en béton (réaction de gonflement interne), conduisant ainsi à des désordres plus préoccupants et plus sévères. Enfin, les désordres sur ouvrages peuvent,

# L'Ettringite





d'une part, apparaître au bout de quelques mois ou de quelques années en fonction du contexte environnant (apport de sulfates, conditions d'humidité, nature des ciments...). Et, d'autre part, la présence d'une fissuration en parement est susceptible d'accélérer l'apparition d'autres phénomènes pathologiques tels que la corrosion des armatures, par exemple.

## 3> Comment réduire les risques de formation d'ettringite expansive ?

La formation d'ettringite est très dépendante de la teneur en aluminates de calcium et de la quantité de chaux disponible, cette dernière ayant une influence significative sur la solubilité de l'ettringite. En conséquence, la nature du ciment est une condition essentielle à la limitation du risque de formation d'ettringite expansive. Dans cette optique, les ciments de type ES (résistant aux sulfates) conformes à la norme NF EN 197-1 sont adaptés à ces problématiques, de même que les ciments renfermant des additions minérales (laitier de haut fourneau et cendres volantes notamment) limitant la quantité de chaux dans la solution interstitielle du béton. D'autre part, les constituants du béton doivent renfermer des quantités limitées de sulfates définies par les normes correspondantes (NF EN 197-1 pour les ciments, XP P 18-545 et NF EN 12-620 pour les granulats).

Dans le cas particulier de l'ettringite de formation différée, les facteurs influant sont la température maximale atteinte dans le béton au jeune âge et la durée de son maintien, la teneur en sulfates, en aluminates et en alcalins, le dosage en ciment et les conditions d'humidité régnant dans le béton. Dans la mesure où l'étude de ce type de pathologie est assez récente, il n'existe pas, pour le moment, de valeurs seuils permettant de réduire le risque d'expansion. Néanmoins, la publication, en mai 2003, d'un projet de méthode d'essai LCPC (méthode LPC n° 59), intitulé "Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne", permet de valider l'utilisation d'une formulation de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne, sur la base d'un critère de performance. Enfin, des recommandations pour la prévention de cette pathologie sont actuellement en cours d'élaboration dans le cadre d'un groupe de travail coordonné par le LCPC.




2003.

## 4> Que faire lorsque les ouvrages sont atteints par une expansion sulfatique ?

En premier lieu, les bétons suspectés d'être affectés par un problème d'ettringite expansive, doivent faire l'objet d'un diagnostic par un laboratoire spécialisé, diagnostic s'articulant autour d'examens au microscope électronique à balayage, seule technique permettant de diagnostiquer avec certitude le caractère potentiellement expansif de l'ettringite. Ce diagnostic doit aussi permettre de recenser tout ou partie des données historiques de l'ouvrage (bétons massifs ou étuvés, nature du ciment...) et de son contexte (source de sulfates, humidité...). Ces données sont essentielles dans ce type de pathologie, car elles permettent de cerner les causes d'origine du phénomène. A ce titre, l'ouvrage GranDuBé (à paraître) donnera une méthodologie de diagnostic assortie d'une charte photographique. Par ailleurs, un essai LPC n° 59 peut être réalisé afin d'estimer le potentiel de gonflement résiduel.

Dans le cas d'une attaque externe, les ouvrages peuvent être réparés de façon traditionnelle par purge du béton "pollué", mise en œuvre d'un produit de réparation adapté et d'une protection de surface. En revanche, dans le cas d'une réaction interne, les phénomènes peuvent tout au plus, comme dans le cas de l'alcali-réaction, être ralentis en appliquant une protection de surface visant à limiter la pénétration d'humidité dans le béton. Le LCPC a par ailleurs édité en 2003 un guide méthodologique destiné entre autres aux maîtres d'ouvrage et aux gestionnaires. Cet ouvrage s'intitule "Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne".




200 .

**Christophe Carde**
Directeur technique du LERM[1]
Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux

## Le sel de Candlot



[1] En tant que laboratoire conseil indépendant spécialisé dans la caractérisation des matériaux de construction et de leurs pathologies, le LERM (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux) est chaque jour confronté à l'étude des problématiques liées aux bétons. La réaction alcali-granulats, plus connue sous l'appellation "alcali-réaction", fait partie des pathologies étudiées et maîtrisées par le laboratoire